

بررسی فرآیند انعقاد الکتریکی با استفاده از الکترودهای آهن و فولاد ضد زنگ جهت تصفیه فاضلاب خمیر مایه

محسن اربابی^۱، سمانه شفیعی^{۲*}، مرتضی سدهی^۳، ابراهیم مظاهری شورابی^۴

گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی شهرکرد، شهرکرد، ایران؛ ^۲کمیته تحقیقات دانشجویی، گروه مهندسی بهداشت محیط،

دانشگاه علوم پزشکی شهرکرد، شهرکرد، ایران؛ ^۳گروه اپیدمیولوژی و آمار زیستی، دانشگاه علوم پزشکی شهرکرد، شهرکرد، ایران.

تاریخ دریافت: ۹۲/۵/۱۵ تاریخ پذیرش: ۹۳/۵/۵

چکیده:

زمینه و هدف: فاضلاب صنعت خمیر مایه یکی از انواع فاضلاب های صنایع غذایی می باشد که حاوی مواد آلاینده آلی و رنگ بالا می باشد. این تحقیق با هدف بررسی فرآیند الکتروکواگولاسیون (Electrocoagulation) با استفاده از الکترودهای آهن و فولاد ضد زنگ به عنوان روشی کارآمد برای تصفیه تکمیلی فاضلاب خمیر مایه انجام شده است.

روش بررسی: در این مطالعه تجربی که از نوع پیلوت آزمایشگاهی بود، اثر متغیرهای بهره برداری مانند دانسیته جریان الکتریکی (۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۴۰ آمپر بر متر مربع)، زمان (۴۵، ۶۰ و ۷۵ دقیقه) و جنس الکتروکود (آهن و فولاد ضد زنگ) بر راندمان حذف اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD)، کدورت و رنگ در فاضلاب خمیر مایه مورد بررسی قرار گرفتند و شرایط بهینه بهره برداری برای هر یک از متغیرها با استفاده از روش آماری تاگوچی (Taguchi) تعیین شد.

یافته ها: بر اساس نتایج، راندمان حذف COD، کدورت و رنگ با افزایش دانسیته جریان الکتریکی و زمان بهره برداری افزایش یافت و راندمان الکتروکود فولاد ضد زنگ بیشتر از الکتروکود آهن بود. شرایط بهره برداری بهینه فرآیند الکتروکواگولاسیون برای تصفیه تکمیلی فاضلاب خمیر مایه در دانسیته جریان الکتریکی ۱۲۰ آمپر بر متر مربع و زمان ماند ۴۵ دقیقه و با استفاده از الکتروکود فولاد ضد زنگ به دست آمد. در این شرایط راندمان حذف COD، کدورت و رنگ به ترتیب برابر ۵۴/۸۴، ۴۴/۹۸ و ۴۰/۲۶ درصد بوده و میزان خوردگی الکتروکود انرژی الکتریکی مصرف شده به ترتیب ۰/۰۸۶ گرم در لیتر و ۳/۲۲۶ وات در لیتر بود.

نتیجه گیری: با در نظر گرفتن اولویت های زیست محیطی و اقتصادی می توان فرآیند الکتروکواگولاسیون در شرایط بهینه بهره برداری را به عنوان یک فرآیند تصفیه تکمیلی فاضلاب های با بار آلودگی بالا و رنگ زیاد پیشنهاد نمود.

واژه های کلیدی: فاضلاب خمیر مایه، الکتروکواگولاسیون، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی، الکتروکود آهن، الکتروکود فولاد ضد زنگ.

مقدمه:

می باشد (۲،۳). ملانوییدین ها پلیمرهای با وزن مولکولی بالا، مسبب رنگ قهوه ای، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (Chemical Oxygen Demand= COD) باقیمانده و نیتروژن در فاضلاب خمیر مایه هستند (۲). در طول تخمیر خمیر مایه، قندهای موجود در ملاس منبع کربن و انرژی می باشند. با این حال بخش عمده ای از ترکیبات غیر قندی ملاس توسط خمیر مایه قابل جذب نبوده و

ترکیبات آلی موجود در فاضلاب صنایع غذایی مسبب مشکلاتی در کارخانجات، تأسیسات تصفیه فاضلاب و محیط می باشند. ملاس فرآورده جانبی تولید قند، عمدتاً به عنوان ماده خام اولیه در تولید خمیر مایه استفاده می شود (۱). ملاس حاوی ۴۵ تا ۵۰ درصد قندهای باقیمانده، ۱۵ تا ۲۰ درصد ترکیبات آلی غیر قندی، ۱۰ تا ۱۵ درصد خاکستر (مواد معدنی) و حدود ۲۰ درصد آب

بدون تغییر وارد فاضلاب پردازش شده می شوند (۲،۳). به علاوه مواد شیمیایی افزوده شده طی تخمیر (مثل ضد کف ها، اسیدهای پروپیونیک، آب نمک و ...) مواد حاصل از تجزیه خمیر مایه و سلول های خمیر مایه باقیمانده، در فاضلاب وجود دارند. به طور خلاصه مشکلات عمده در تصفیه فاضلاب خمیر مایه، غلظت بالای (Biological Oxygen Demand= BOD) و COD در پساب، رنگ، بو و مقادیر بالایی از لجن اضافی تولید شده در فرآیند تصفیه فاضلاب می باشند که قبل از تخلیه نیاز به تصفیه دارند (۲)؛ بنابراین تخلیه فاضلاب خمیر مایه با آلودگی آلی و رنگ بالا و بدون تصفیه به محیط زیست عواقب خطرناک آلودگی منابع خاک و آب را به وجود خواهد آورد.

یکی از روش های به کار رفته برای تصفیه فاضلاب های قوی فرآیند الکتروکواگولاسیون (EC) می باشد که مزایای آن شامل تجهیزات ساده، بهره برداری آسان، زمان تصفیه کوتاهتر، کاهش استفاده از مواد شیمیایی، تولید لجن کمتر می باشد، به علاوه روشی منطقی و تأثیر گذار برای تصفیه محدوده متنوعی از فاضلاب ها و پساب ها می باشد (۴).

انعقاد پدیده ای است که در آن ذرات باردار در سوسپانسیون کلئیدی به وسیله برخورد متقابل با یون های دارای بار مخالف خنثی و فشرده شده و به دنبال آن ته نشین می شوند (۵).

فرآیند EC یک فرآیند ترکیبی شامل بسیاری از پدیده های شیمیایی و فیزیکی، با استفاده از الکترودهای مصرفی برای تأمین یون درون جریان فاضلاب می باشد. در یک فرآیند الکتروکواگولاسیون یون های منعقد کننده در محل تولید می شوند و این فرآیند شامل سه مرحله پی در پی؛ ۱) تشکیل منعقد کننده ها توسط اکسیداسیون الکتریکی الکتروود قربانی؛ ۲) ناپایدارسازی آلاینده ها، تعلیق ذرات و شکستن امولسیون ها؛ ۳) تجمع فازهای ناپایدار شده برای تشکیل لخته ها می باشد (۸-۶). مکانیسم ناپایدار سازی آلاینده ها در فرآیند الکتروکواگولاسیون، شامل؛ فشرده سازی دو لایه پراکنده در اطراف ذرات

باردار توسط فعل و انفعالات یون های تولید شده توسط اکسیداسیون آند قربانی؛ خنثی سازی بار الکتریکی گونه های یونی موجود در فاضلاب توسط یون هایی با بار مخالف تولید شده توسط انحلال الکتروشیمیایی آند و تشکیل فلاک که خود باعث ایجاد پتوی لجن می گردد و ذرات کلئیدی ای که هنوز در محیط آبی باقی مانده اند را به دام می اندازند (۹).

در محیط های آبی معمول و در شرایط فرآیند EC، آهن می تواند به دو شکل آهن دو ظرفیتی و آهن سه ظرفیتی حل شود. در صورتی که پتانسیل اکسیداسیون- احیا و شرایط pH مناسب باشد، آهن دو ظرفیتی می تواند بیشتر به آهن سه ظرفیتی اکسید شود. برای دستیابی به سرعت واکنش مناسب بایستی اکسیژن وجود داشته باشد و pH خنثی یا قلیایی باشد (۷،۸،۱۰).

از آنجایی که واکنش های الکتروشیمیایی در فرآیند EC در سطح الکترودها رخ می دهد، غلظت محصولات واکنش در سطح الکتروود در بالاترین حد بوده و شیب (گرادیان) غلظت از سطح الکتروود به سمت حجم محلول وجود دارد. بنابراین pH در مجاورت آند کاهش و بالعکس در سطح کاتد افزایش می یابد. این موضوع منجر به رسوب نمک های معدنی روی سطح الکتروود می شود. اگر پتانسیل الکتروشیمیایی در کاتد در سمت راست باشد، کاهش (احیا) الکتروشیمیایی کاتیون های فلزی ممکن است در سطح کاتد رخ دهد (۹،۱۱).

در واکنشی موازی آب نیز هیدرولیز می شود و تولید حباب های کوچکی از اکسیژن در آند و هیدروژن در کاتد می کند. این حباب ها ذرات لخته شده را جذب کرده و از طریق شناوری طبیعی، آلاینده های لخته شده را به سطح شناور می کنند (۹). واکنش های دیگری مانند تشکیل هیدروژن در کاتد، افزایش pH به علت تشکیل یون های هیدروکسیل و یا مصرف یون های هیدرونیوم پروتون نیز رخ می دهد (۹،۱۲،۱۳).

در پژوهشی که در سال ۲۰۰۸ انجام گرفت، فرآیند الکتروکواگولاسیون برای تصفیه فاضلاب خمیر مایه مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش اثر

متغیرهای فرآیند از قبیل pH، جنس الکتروود (آهن و آلومینیوم)، چگالی جریان و زمان بهره برداری بر حسب راندمان حذف COD، TOC (Total Organic Carbon)، کدورت و هزینه بهره برداری مورد مطالعه قرار گرفته و این نتیجه حاصل شد که حداکثر راندمان حذف COD، TOC و کدورت در شرایط بهره داری بهینه به ترتیب برابر ۷۱، ۵۳ و ۹۰ درصد می باشد (۲).

در پژوهشی دیگر که در سال ۲۰۰۵ Pala و همکارش از فرآیند اکسیداسیون فنتون برای رنگ زدایی و حذف آلاینده های غیر قابل تجزیه بیولوژیکی از فاضلاب خمیر مایه استفاده نمودند و موفق به حذف ۹۹ درصد رنگ، حذف ۹۰ درصد DOC و ۸۸ درصد COD شدند (۱). در سال ۲۰۰۵ راکتور (Upflow Anaerobic Sludge Blanket= UASB) در مقیاس صنعتی به منظور تصفیه بیولوژیکی پساب کارخانه خمیر مایه مورد بررسی قرار گرفت و راندمان تصفیه COD برابر ۶۵-۶۰ درصد و راندمان تصفیه BOD برابر ۹۵-۹۰ درصد به دست آمد (۳).

در پژوهشی که در سال ۲۰۱۰ انجام شد کاربرد فرآیند الکتروکواگولاسیون با استفاده از الکترودهای فولاد ضد زنگ در شرایط بهره برداری بهینه منجر به حذف COD تا حدود ۷۴ درصد و حذف رنگ تا بیش از ۹۸ درصد می باشد (۱۴). سعیدی و همکارش در سال ۲۰۰۹ موفق شدند با کاربرد روش انعقاد الکتریکی، COD پساب خروجی پالایشگاه گازی پارس جنوبی را تا بیش از ۹۵ درصد کاهش دهند (۴).

الکتروکواگولاسیون به طور موفقیت آمیزی در تصفیه فاضلاب لبنیات سازی (۱۵، ۱۰)، حذف نیترات از آب ها (۱۶، ۶)، حذف کدورت از آب (۱۷) و حذف کدورت و فلزات سنگین (۱۱) و غیره به کار گرفته شده است. روش های متعددی برای بهینه سازی پارامترهای مؤثر در فرآیندها وجود دارد، یکی از این روش ها آزمون تاگوچی می باشد که در سال ۱۹۶۰ توسط دکتر جنچی تاگوچی ابداع شده است (۲۰-۱۸).

ابزار کلیدی این روش برای طراحی آزمایشات، طراحی با روش های آماری می باشد. ابزار مورد استفاده تاگوچی جهت تحلیل نتایج حاصل از آزمایشات، روش تحلیل نسبت سیگنال به نویز (SN ratio) می باشد که عبارتند از نسبت عوامل ثابت عملیاتی به عوامل اغتشاش که غیر قابل کنترل هستند. در روش تاگوچی آزمایشات برای دستیابی به اهداف، تعیین شرایط بهره برداری بهینه، بررسی میزان تأثیر هر یک از پارامترها بر روی پاسخ و برآورد پاسخ تحت شرایط بهینه، تجزیه و تحلیل می گردد (۲۱، ۱۸).

در مطالعات متعددی که فرآیند الکتروکواگولاسیون مورد بررسی قرار گرفته است، پارامترهایی مانند زمان بهره برداری (۲۲، ۱۲)، چگالی جریان (۲۳، ۲۲، ۴)، جنس الکتروود (۲) و غیره به عنوان متغیر در نظر گرفته شده؛ اما به طور کلی در پژوهش حاضر، طراحی سیستم تصفیه از نظر متغیرهای تعیین شده و ویژگی های فاضلاب آزمایش شده با سایر مقالات متفاوت می باشد، برای مثال فاضلاب مورد استفاده در این تحقیق دارای آلودگی آلی و رنگ بالا بود. بنابراین هدف مطالعه حاضر تمرکز بر کاربرد فرآیند الکتروکواگولاسیون به منظور تصفیه فاضلاب خمیرمایه با غلظت COD و رنگ بالا و تعیین اثر پارامترهای بهره برداری عمده مانند زمان بهره برداری، چگالی جریان و جنس الکتروود (آهن و فولاد ضد زنگ) بر میزان کاهش COD، رنگ و کدورت می باشد.

روش بررسی:

این تحقیق تجربی در مقیاس آزمایشگاهی و به صورت ناپیوسته انجام شد. در این پژوهش، اثر پارامترهایی چون جنس الکتروود، زمان ماند و دانسیته جریان الکتریکی بر میزان تصفیه فاضلاب مورد ارزیابی قرار گرفت. راکتور استفاده شده در این طرح از جنس اپوکسی گلاس به حجم مفید ۱۲۵۰ سانتی متر مکعب بود (تصویر شماره ۱).

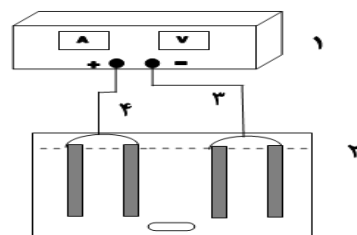
استفاده شد. برای تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز فرآیند، از یک دستگاه تأمین کننده جریان مستقیم (مدل MPS-6005L-2 Matrix) استفاده شد.

بعد از برقراری جریان الکتریکی که با تغییر آمپر روی صفحه دیجیتالی مشخص می شود، بر اساس متغیرهای تعریف شده یعنی؛ زمان، شدت جریان، جنس الکترود، به نمونه و الکترود فرصت واکنش داده شد. پس از سنجش pH، نمونه های مورد نیاز برای تعیین اثر پارامترهای مختلف، در زمان های ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه و دانسیته های جریان ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۱۴۰ آمپر بر متر مربع برداشت شدند و پس از فیلتراسیون با کاغذ صافی واتمن با مش ۰/۴۵ میکرومتر و ترقیق، راندمان فرآیند الکتروکواگولاسیون در تصفیه فاضلاب خمیر مایه مورد ارزیابی قرار گرفت.

به منظور شستشو و تعیین میزان خوردگی الکترودها ابتدا الکترودها در محلول اسید کلریدریک ۲ درصد قرار گرفته و پس از آبکشی با استفاده از فور خشک و سپس توزین شدند.

در این تحقیق، آزمایش pH با استفاده از pH متر مدل pH lab-Metrohm-827، آزمایش COD مطابق روش 5220C و با استفاده از راکتور هضم مدل DRB 200 HACH، آزمایش رنگ مطابق روش شماره ۸۰۲۷ و آزمایش کدورت مطابق روش شماره ۸۲۳۷ با استفاده از دستگاه DR2000 انجام گرفت. کلیه آزمایشات بر اساس کتاب روش های استاندارد آزمایشات آب و فاضلاب انجام شد (۲۴).

به منظور تعیین شرایط بهینه فرآیند الکتروکواگولاسیون (شامل جنس الکترود، زمان ماند و دانسیته جریان الکتریکی) با استفاده از آزمون تاگوچی نمودار شرایط بهینه بهره برداری با انتخاب حالت کوچکتر، بهترین (Smaller is Better) با استفاده از فرمول
$$\frac{S}{N} = -10 \log \frac{(y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2)}{n}$$
 رسم شد. نمودار حداکثر راندمان تصفیه با استفاده از آزمون تاگوچی



تصویر شماره ۱: شماتیک پیلوت طراحی شده راکتور

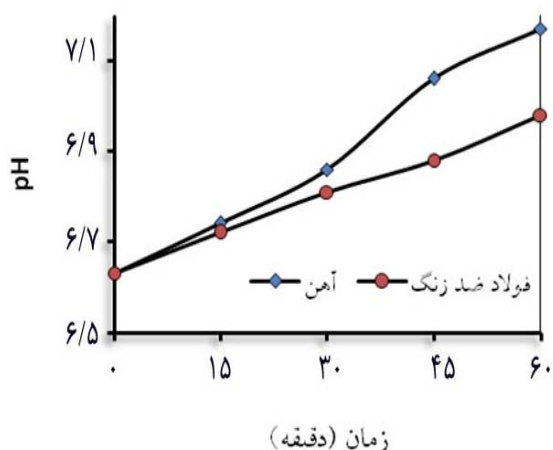
الکتروکواگولاسیون برای تصفیه فاضلاب خمیر مایه.

۱: منبع تأمین برق مستقیم (DC)، ۲: راکتور EC، ۳: اتصال کاتد، ۴: اتصال آند.

فاضلاب خمیر مایه مورد بررسی در این پژوهش از شرکت خمیر مایه پاک مایه کرمانشاه دریافت شد. میزان تولید این کارخانه در سال ۴۵۰۰ تن خمیر مایه و میزان فاضلاب تولیدی آن ۳۵۰ الی ۴۰۰ متر مکعب در روز می باشد.

نمونه فاضلاب خمیر مایه به صورت مرکب و از دو سپراتور جمع آوری شده و به آزمایشگاه انتقال یافت. برای شروع آزمایش ابتدا میزان ۱/۲۵ لیتر نمونه در راکتور ریخته شد و سپس الکترودها به صورت موازی با هم و با فاصله ۳ سانتی متر از هم و ۲ سانتی متر از کف راکتور و به صورت دو قطبی مورد بهره برداری قرار گرفتند.

در این فرآیند جریان مثبت و منفی به طور مساوی بین دو الکترودهای کاتد و آند پخش شده و بنابراین در این حالت میزان مصرف انرژی و نیز خوردگی الکترودها به میزان قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. مشخصات الکترودها مورد استفاده در این مطالعه شامل: جنس آند و کاتد از آهن و فولاد ضد زنگ، شکل مستطیلی، اندازه ۷۰×۸۰ میلیمتر، ضخامت یک میلیمتر و سطح موثر ۴۹ سانتی متر مربع و مشخصات راکتور مورد استفاده شامل: حالت ناپیوسته، ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلیمتر (طول، عرض، ارتفاع) و میزان اختلات ۳۰۰ دور در دقیقه بود. به منظور اختلاط محتویات فاضلاب و ایجاد مخلوطی یکنواخت در این فرآیند، از یک مگنت الکتریکی



نمودار شماره ۱: مقایسه اثر فرآیند الکتروکاتالیز بر تغییرات pH بر الکترودهای آهن و فولاد ضد زنگ در زمان های مختلف بهره برداری

روند تغییرات حذف COD، کدورت و رنگ در دانسیته های مختلف جریان الکتریکی برای الکترودهای آهن و فولاد ضد زنگ نشان می دهد، راندمان کلی تصفیه فاضلاب خمیر مایه با افزایش دانسیته جریان الکتریکی افزایش می یابد. افزایش دانسیته جریان الکتریکی در محدوده ۸۰ تا ۱۲۰ آمپر بر متر مربع باعث افزایش راندمان تصفیه فاضلاب خمیر مایه می شود؛ اما دانسیته جریان الکتریکی بیشتر از ۱۲۰ آمپر بر متر مربع راندمان بیشتری ایجاد نمی کند. هنگام استفاده از الکترودهای آهن راندمان حذف COD، کدورت و رنگ در دانسیته جریان الکتریکی ۱۲۰ به ترتیب برابر ۳۳/۳۵، ۱۱/۹۴ و ۲۹/۳۴ درصد و در دانسیته جریان ۱۴۰ به ترتیب برابر ۳۵، ۳۳/۸۷ و ۲۷/۸ درصد بود و هنگام استفاده از الکترودهای فولاد ضد زنگ راندمان حذف COD، کدورت و رنگ در دانسیته جریان الکتریکی ۱۲۰ آمپر بر متر مربع به ترتیب برابر ۳۴/۵۳، ۴۷/۱۵ و ۳۸/۵۷ درصد و در دانسیته جریان ۱۴۰ آمپر بر متر مربع به ترتیب برابر ۳۴/۵۱، ۴۹/۲۲ و ۳۷/۵۳ درصد می باشد.

و با انتخاب حالت بزرگتر، بهترین (Larger is Better) با

$$\frac{s}{n} = -10 \log \frac{(1 + \frac{s_1}{n_1} + \frac{s_2}{n_2} + \dots + \frac{s_n}{n_n})}{n}$$

استفاده از فرمول

برای به دست آوردن حداکثر راندمان حذف COD، کدورت و رنگ در شرایط بهینه رسم شد که در آن که y_n جواب آزمایش و n تعداد راه اندازی های تجربی می باشد.

هزینه کل بهره برداری از فرآیند الکتروکاتالیز جهت تصفیه هر متر مکعب فاضلاب خمیر مایه با در نظر گرفتن قیمت هر گرم آهن ۲۲۰ ریال، قیمت هر گرم فولاد ضد زنگ ۶۱۰ ریال و هر کیلو وات ساعت برق تجاری ۱۱۰۰ ریال محاسبه گردید.

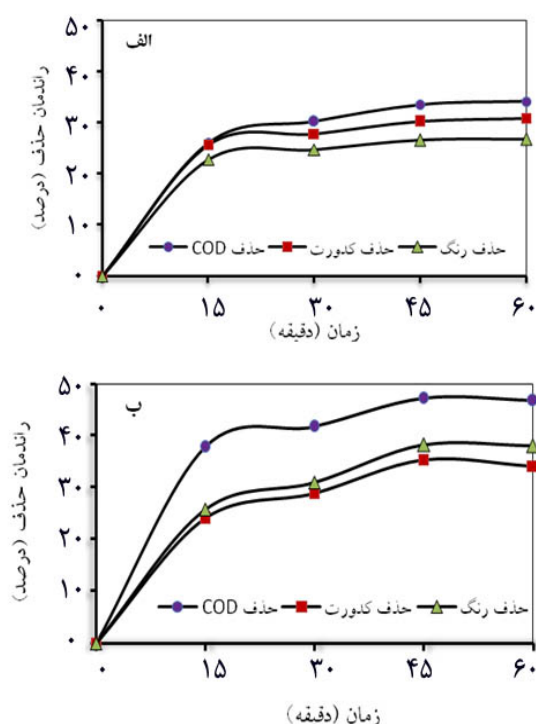
نتایج حاصل از این تحقیق با استفاده از نرم افزار Excel و نیز آزمون تاگوچی در محیط Minitab^{۱۵} مورد آنالیز قرار گرفتند.

یافته ها:

کیفیت فاضلاب استفاده شده در این تحقیق با استفاده از آزمایشات صورت گرفته در آزمایشگاه مشخص شد. بر اساس نتایج، کل مواد جامد (TS) ۴۷۵۵۶mg/l، کل مواد جامد معلق (TSS) ۴۳۹۰۷mg/l، کل مواد جامد محلول (TDS) ۳۶۴۹mg/l، میکرو موس بر سانتی متر، ۹۳۰۱۷EC، COD ۳۱۰۰۰mg/l، رنگ ۳۸۹۰۰TCU و کدورت ۷۷۰۰NTU می باشد.

pH فاضلاب خام خمیر مایه ۶/۶۳ بود و فرآیند الکتروکاتالیز منجر به افزایش pH شد و هنگام استفاده از الکترودهای آهن افزایش pH بیشتر از الکترودهای فولاد ضد زنگ به دست آمد (نمودار شماره ۱).

بهره برداری ۶۰ دقیقه برابر ۳۴/۴۶، ۱۴/۷۳ و ۳۸/۰۷ درصد بود (نمودار شماره ۳).



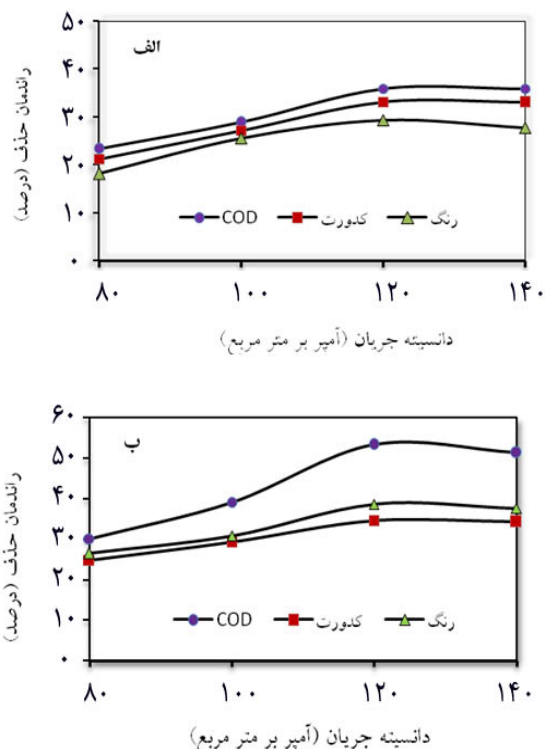
نمودار شماره ۳: روند تغییرات حذف COD.

کدورت و رنگ در زمان های مختلف برای

الکترودهای آهن و فولاد ضد زنگ

(الف) الکترودهای آهن؛ (ب) الکترودهای فولاد ضد زنگ.

بر اساس نمودار شرایط بهینه بهره برداری از فرآیند الکتروکواگولاسیون با استفاده از آزمون تاگوشی با انتخاب حالت کوچکتر، بهترین (Smaller is Better) و نمودار حداکثر راندمان تصفیه در شرایط بهینه بهره برداری با استفاده از آزمون تاگوشی و با انتخاب حالت بزرگتر، بهترین (Larger is Better)، نتیجه گیری می شود که کارایی الکترودهای فولاد ضد زنگ در تصفیه فاضلاب خمیر مایه و حذف متغیرهای وابسته (COD، کدورت و رنگ) بیشتر از الکترودهای آهن می باشد، همچنین، شرایط بهینه فرآیند الکتروکواگولاسیون شامل الکترودهای فولاد ضد زنگ، زمان ماند ۴۵ دقیقه و دانسیته جریان الکتریکی ۱۲۰ آمپر بر متر مربع به دست آمد (نمودار شماره ۴).



نمودار شماره ۴: روند تغییرات حذف COD، کدورت و

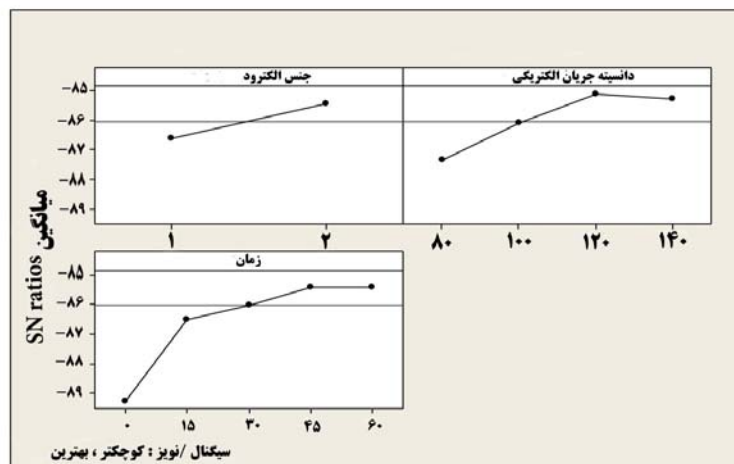
رنگ در دانسیته های مختلف جریان الکتریکی برای

الکترودهای آهن و فولاد ضد زنگ

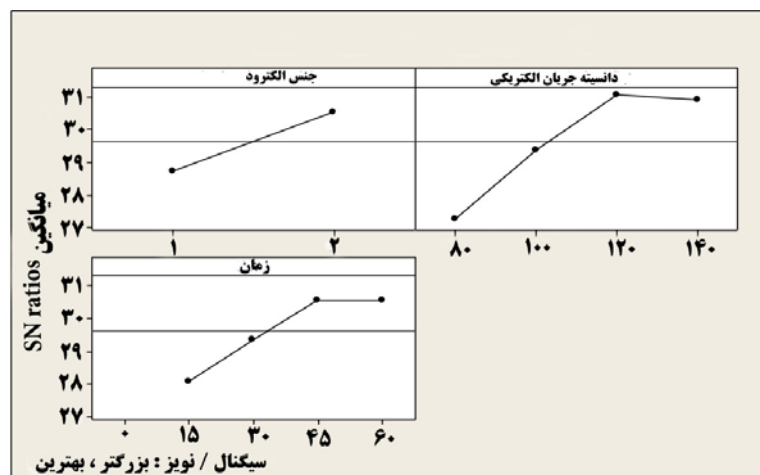
(الف) الکترودهای آهن؛ (ب) الکترودهای فولاد ضد زنگ.

روند تغییرات حذف COD، کدورت و رنگ

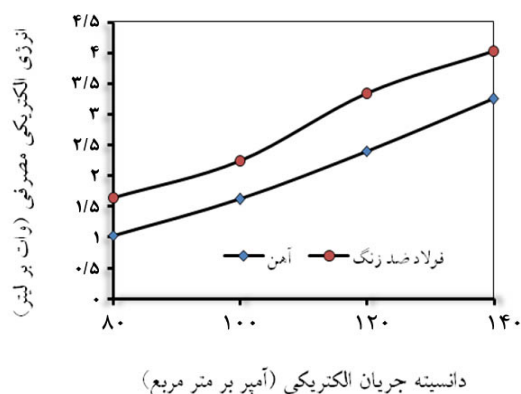
در زمان های مختلف برای الکترودهای آهن و فولاد ضد زنگ نشان می دهد، راندمان کلی تصفیه فاضلاب خمیر مایه با افزایش زمان بهره برداری افزایش می یابد. با افزایش زمان بهره برداری از ۰ تا ۴۵ دقیقه راندمان حذف COD، کدورت و رنگ افزایش می یابد؛ اما زمان ماند بیشتر از ۴۵ دقیقه راندمان بیشتری ایجاد نمی کند. بر این اساس، هنگام استفاده از الکترودهای آهن، راندمان حذف COD، کدورت و رنگ برای زمان ۴۵ دقیقه برابر ۳۰/۳۳، ۱۹/۵۳ و ۲۶/۵۶ درصد و برای زمان بهره برداری ۶۰ دقیقه برابر ۳۰/۳۴، ۱۴/۷۳ و ۲۶/۷۳ درصد و هنگام استفاده از الکترودهای فولاد ضد زنگ راندمان حذف COD، کدورت و رنگ برای زمان ۴۵ دقیقه برابر ۳۵/۴۷، ۳۹/۱۷ و ۳۸/۲۶ درصد و برای زمان



نمودار شماره ۴: شرایط بهینه بهره برداری از فرآیند الکترود کوآگولاسیون با استفاده از آزمون تاگوچی با انتخاب حالت کوچکتر، بهترین (Smaller is Better)



نمودار شماره ۵: حداکثر راندمان تصفیه در شرایط بهینه بهره برداری از فرآیند الکترود کوآگولاسیون با استفاده از آزمون تاگوچی و با انتخاب حالت بزرگتر، بهترین (Larger is Better)



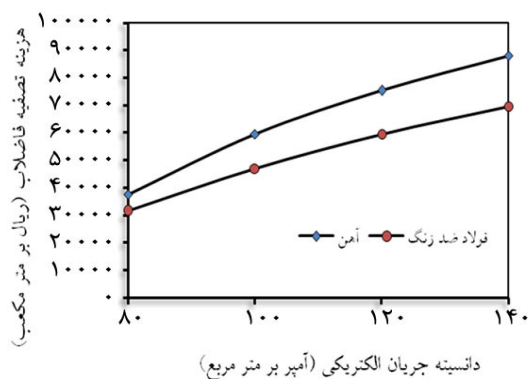
نمودار شماره ۶: مقایسه تغییرات انرژی الکتریکی مصرفی در دانشیه جریان های الکتریکی مختلف برای دو الکترود آهن و فولاد ضد زنگ در فرآیند الکترود کوآگولاسیون

در مقایسه تغییرات انرژی الکتریکی مصرفی در دانشیه جریان های الکتریکی مختلف برای دو الکترود آهن و فولاد ضد زنگ در فرآیند الکترود کوآگولاسیون مشاهده شد، افزایش دانشیه جریان الکتریکی با افزایش انرژی الکتریکی مصرفی همراه می باشد. در شرایط بهینه فرآیند میزان برق مصرفی هنگام استفاده از الکترود آهن ۲/۴۰۷ وات در لیتر فاضلاب و هنگام استفاده از الکترود فولاد ضد زنگ ۳/۲۲۶ وات در لیتر فاضلاب می باشد (نمودار شماره ۶).

جنس الکترود با دلتای برابر ۲/۲۴ و ۱/۱۸ در رتبه دوم و سوم بر راندمان تصفیه مؤثر می باشند.

نتایج آزمون آنالیز واریانس یک طرفه (ANOVA) در آزمون تاگوچی نشان می دهد که هر ۳ عامل جنس الکترود، دانسیته جریان الکتریکی و زمان بهره برداری بر راندمان حذف COD، کدورت و رنگ تأثیر معنی دار دارند ($P < 0.001$).

هزینه کل بهره برداری از فرآیند الکترودکواگولاسیون جهت تصفیه هر متر مکعب فاضلاب خمیر مایه با در نظر گرفتن قیمت هر گرم آهن ۲۲۰ ریال، قیمت هر گرم فولاد ضد زنگ ۶۱۰ ریال و هر کیلو وات ساعت برق تجاری ۱۱۰۰ ریال محاسبه گردید. در کل هزینه تصفیه هر متر مکعب فاضلاب خمیر مایه با استفاده از فرآیند الکترودکواگولاسیون در شرایط بهینه ۸۹۶۲۰ ریال به دست آمد و با توجه به این که هزینه کل بهره برداری از فرآیند الکترودکواگولاسیون هنگام استفاده از الکترود فولاد ضد زنگ کمتر از الکترود آهن می باشد، می توان الکترود فولاد ضد زنگ را به عنوان جنس الکترود بهینه انتخاب نمود (نمودار شماره ۸).



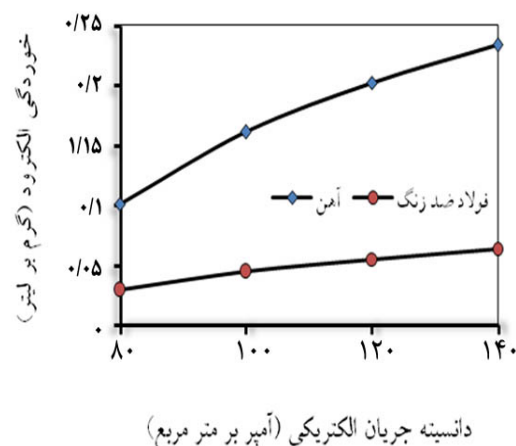
نمودار شماره ۸: مقایسه تغییرات هزینه تصفیه فاضلاب خمیر مایه در دانسیته جریان های الکتریکی مختلف برای دو الکترود آهن و فولاد ضد زنگ در فرآیند الکترودکواگولاسیون

بحث:

بر اساس نتایج این مطالعه، راندمان کلی تصفیه فاضلاب خمیر مایه با افزایش دانسیته جریان افزایش

بررسی تغییرات میزان خوردگی الکترود آهن و فولاد ضد زنگ را در دانسیته جریان های الکتریکی مختلف در فرآیند الکترودکواگولاسیون نشان داد، افزایش دانسیته جریان الکتریکی با افزایش میزان خوردگی الکترود همراه می باشد. در شرایط بهینه فرآیند میزان خوردگی الکترود آهن ۰/۲۴۶ گرم در لیتر و میزان خوردگی الکترود فولاد ضد زنگ میزان خوردگی ۰/۰۸۶ گرم در لیتر می باشد (نمودار شماره ۷).

لازم به ذکر است که در کار با الکترود فولاد ضد زنگ انرژی الکتریکی مصرفی کمی بیشتر از الکترود آهن بود در عوض الکترود فولاد ضد زنگ خوردگی کمتری نسبت به الکترود آهن داشت. همچنین به منظور کاهش میزان خوردگی الکترود، هنگام کار با دستگاه تأمین کننده جریان الکتریکی جای کاند و آند هر ۱۵ دقیقه یک بار به ترتیب تعویض می گردید.



نمودار شماره ۷: بررسی تغییرات میزان خوردگی الکترود آهن و فولاد ضد زنگ را در دانسیته جریان های الکتریکی مختلف در فرآیند الکترودکواگولاسیون

بر اساس نتایج به دست آمده و آنالیز تاگوچی نتیجه گیری می شود که پارامتر زمان بهره برداری در رتبه اول با دلتای برابر ۳/۸۵ بیشترین سهم را بر راندمان تصفیه داشته و پارامترهای دانسیته جریان الکتریکی و

می یابد و درصد حذف COD، کدورت و رنگ از فاضلاب در دانسیته جریان الکتریکی ۱۲۰ آمپر بر متر مربع کمی بیشتر از درصد حذف COD، کدورت و رنگ در دانسیته جریان الکتریکی ۱۴۰ آمپر بر متر مربع به دست آمد. در برخی تحقیقات مانند کاهش COD پساب پالایشگاه گازی پارس جنوبی با استفاده از فرآیند EC توسط محسن سعیدی، حذف رنگ از محیط های آبی به وسیله فرآیند EC توسط SenthilKumar و همکاران، حذف کادمیوم از پساب های صنعتی به وسیله فرآیند EC توسط بذر افشان و همکاران و حذف آرسنیک از آب به وسیله فرآیند EC توسط Ratna Kumar و همکاران، مشخص شده است که دانسیته جریان الکتریکی بیشتر باعث حذف بیشتر COD، رنگ و آلاینده های مورد بررسی می گردد (۴،۱۴،۲۵،۲۶). بنابراین به دلیل این که راندمان تصفیه در دانسیته جریان الکتریکی ۱۲۰ آمپر بر متر مربع کمی بیشتر از دانسیته جریان ۱۴۰ آمپر بر متر مربع می باشد. به منظور صرفه جویی در مصرف انرژی الکتریکی دانسیته جریان الکتریکی ۱۲۰ آمپر بر متر مربع به عنوان دانسیته جریان الکتریکی بهینه در فرآیند الکتروکواگولاسیون انتخاب شد.

در این مطالعه، راندمان کلی تصفیه فاضلاب خمیر مایه با افزایش زمان بهره برداری افزایش می یابد، بنابراین با توجه به نزدیکی راندمان های حذف و عدم افزایش قابل توجه راندمان در زمان بیشتر از ۴۵ دقیقه می توان برای صرفه جویی در زمان و انرژی الکتریکی مصرفی زمان ۴۵ دقیقه را به عنوان زمان ماند بهینه انتخاب نمود. نتیجه یافت شده در ارتباط با اثر زمان بهره برداری و دانسیته جریان الکتریکی با نتیجه پژوهش آرش دالوند و همکارانش که افزایش زمان واکنش با افزایش راندمان تصفیه و افزایش مصرف انرژی همراه است مطابقت دارد (۲۷).

از یافته های این مطالعه نتیجه گیری می شود که کارایی الکتروکود فلزات ضد زنگ در تصفیه فاضلاب خمیر مایه و حذف متغیرهای وابسته (COD، کدورت و رنگ) بیشتر از الکتروکود آهن

می باشد. این نتیجه، یافته های Kobya و همکارش که به علت تداخلات حاصل از آهن محلول، الکتروکود فلزات ضد زنگ برای حذف رنگ کارآمدتر از الکتروکود آهن می باشد را تصدیق می نماید (۲).

همانطور که قبلاً نیز ذکر شد، آزمون تاگوچی با در نظر گرفتن کلیه متغیرهای مستقل و وابسته شرایط بهینه آزمایش را مشخص می کند (نمودار ۵، ۴). این شرایط شامل جنس بهینه الکتروکود فلزات ضد زنگ، دانسیته جریان الکتریکی ۱۲۰ آمپر بر متر مربع و زمان ماند ۴۵ دقیقه می باشد که نتایج به دست آمده از سایر نمودارها را نیز تأیید می کند.

مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر هزینه های بهره برداری از فرآیند الکتروکواگولاسیون شامل هزینه انرژی الکتریکی مصرفی و خوردگی الکتروکود در اثر انحلال الکتریکی می باشد. نتایج نشان داد که این دو پارامتر با افزایش زمان بهره برداری و دانسیته جریان الکتریکی افزایش می یابد. لازم به ذکر است که در کار با الکتروکود فلزات ضد زنگ انرژی الکتریکی مصرفی کمی بیشتر از الکتروکود آهن بود در عوض الکتروکود فلزات ضد زنگ خوردگی کمتری نسبت به الکتروکود آهن داشت. با توجه به این که هزینه هر گرم آهن ۲۲۰ ریال، هر گرم فلزات ضد زنگ ۶۱۰ ریال و هزینه برق مصرفی تجاری ۱۱۰۰ ریال به ازای هر کیلو وات ساعت می باشد و هزینه بهره برداری از فرآیند الکتروکواگولاسیون در شرایط بهره برداری بهینه جهت تصفیه هر متر مکعب فاضلاب خمیرمایه ۸۹۶۲۰ ریال می باشد.

بر اساس نتایج به دست آمده و آنالیز تاگوچی نتیجه گیری می شود که پارامتر زمان بهره برداری در رتبه اول با دلتای برابر ۳/۸۵ بیشترین سهم را بر راندمان تصفیه داشته و پارامترهای دانسیته جریان الکتریکی و جنس الکتروکود با دلتای برابر ۲/۲۴ و ۱/۱۸ در رتبه دوم و سوم بر راندمان تصفیه مؤثر می باشند.

نتیجه گیری:

از یافته های این مطالعه می توان نتیجه گرفت که شرایط بهینه فرآیند الکترودکوکولاسیون شامل جنس بهینه الکترود فولاد ضد زنگ، دانسیته جریان الکتریکی ۱۲۰ آمپر بر متر مربع و زمان ماند ۴۵ دقیقه می باشد. لازم به ذکر است که در شرایط بهینه فرآیند میزان خوردگی ۰/۰۸۶ گرم در لیتر و میزان برق مصرفی ۳/۲۲۶ وات در لیتر فاضلاب و هزینه بهره برداری کل ۸۹۶۲۰ ریال به ازای هر متر مکعب فاضلاب می باشد. با توجه به نتایج یافت شده و در نظر گرفتن اولویت های زیست محیطی و اقتصادی می توان این فرآیند را به عنوان فرآیند تصفیه تکمیلی فاضلاب های با بار

آلودگی بالا و فاضلاب های حاوی رنگ زیاد پیشنهاد کرد.

تشکر و قدردانی:

بدینوسیله نویسندگان از معاونت محترم تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی شهرکرد به خاطر حمایت های مالی ایشان در انجام این پژوهش و خانم دکتر رضایی (مدیر عامل محترم کارخانه) و خانم مهندس کریمی (مدیر بهداشت محیط کارخانه) شرکت خمیر مایه پاک مایه کرمانشاه، به خاطر ارسال نمونه های پساب خمیرمایه قدردانی و امتنان خود را اعلام می کند.

منابع:

1. Pala A, Erden G. Decolorization of a baker's yeast industry effluent by Fenton oxidation. J Hazard Mater. 2005;127(1): 141-8.
2. Kobya M, Delipinar S. Treatment of the baker's yeast wastewater by electrocoagulation. J Hazard Mater. 2008; 154(1): 1133-40.
3. Kalyuzhnyi S, Glanchenko M, Starostina E, Shcherbakov S, Versprille A. Combined biological and physico-chemical treatment of baker's yeast wastewater. Water Sci Technol. 2005; 52(1): 175-81.
4. Saeidi Mohsen KFA. COD reduction in effluent from Southern Pars Gas Refinery using electrocoagulation. J Water Wastewater. 2009; 21(73): 40-8.
5. Pérez Lozano VM. Wastewater treatment by electrocoagulation (EC) [dissertation]. Spain: University of Alicante; 2012.
6. Koparal AS, Ögütveren ÜB. Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation. J Hazard Mater. 2002; 89(1): 83-94.
7. Saleem M, Bukhari AA, Akram MN. Electrocoagulation for the treatment of wastewater for reuse in irrigation and plantation. J Basic Appl Sci. 2011; 7(1):11-20.
8. Vepsäläinen M, Kivisaari H, Pulliainen M, Oikari A, Sillanpää M. Removal of toxic pollutants from pulp mill effluents by electrocoagulation. Sep Purif Technol. 2011; 81(2): 141-50.
9. Mollah MY, Morkovsky P, Gomes JA, Kesmez M, Parga J, Cocke DL. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. J Hazard Mater. 2004; 114(1): 199-210.
10. Şengil İA. Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes. J Hazard Mater. 2006; 137(2): 1197-205.
11. Merzouk B, Gourich B, Sekki A, Madani K, Chibane M. Removal turbidity and separation of heavy metals using electrocoagulation-electroflotation technique: A case study. J Hazard Mater. 2009; 164(1): 215-22.
12. Kurt U, Gonullu MT, Ilhan F, Varınca K. Treatment of domestic wastewater by electrocoagulation in a cell with Fe-Fe electrodes. Environ Eng Sci. 2008; 25(2): 153-62.
13. Mouedhen G, Feki M, Wery MP, Ayedi H. Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process. J Hazard Mater. 2008; 150(1):124-135.
14. SenthilKumar P, Umaiyambika N, Gayathri R. Dye removal from aqueous solution by electrocoagulation process using stainless steel electrodes. Environ Eng Manage J. 2010; 9(8): 1031-7.

15. Tchamango S, Nanseu-Njiki CP, Ngameni E, Hadjiev D, Darchen A. Treatment of dairy effluents by electrocoagulation using aluminium electrodes. *Sci Total Environ*. 2010; 408(4): 947-52.
16. Lacasa E, Cañizares P, Saez C, Fernández FJ, Rodrigo MA. Removal of nitrates from groundwater by electrocoagulation. *Chem Eng J*. 2011; 171(3):1012-7.
17. Rahmani A. Removal of water turbidity by the electrocoagulation method. *J Res Health Sci*. 2008; 8(1): 18-24.
18. Jorfi S, Yaghmaeian K, Talaie AR, Mousavi G, Rezaei Kalantary R, Farzadkia M. Optimization of propylene glycol removal in a fixed bed activated sludge bioreactor by Taguchi method. *Koomesh*. 2009; 11(1): 15-26.
19. Hoor M, Riahi N, Emamgholizadeh Sayar P. Application of Taguchi experimental design method in the synthesis of nano titanium dioxide powder by used Soy-Gel method in solar cells. 27th International Conference; Tehran, Iran: 2012; 1-8.
20. Sadeghi AR, Babakhani A, Zebarjad SM, Mostajabodaveh MH, Optimization of powder metallurgy processing for fabrication of NiTi shape memory alloy using grey-based Taguchi method. *J Mater Eng Perform*. 2012; 5(1):1-21.
21. Ardekani MM, Haghighifard N, Nodehi R, Yazdanbakhsh A. Optimization of moving bed biofilm reactor using Taguchi method. *Iran J Health Environ*. 2009; 2(1): 1-15.
22. Ni'am MF, Othman F, Sohaili J, Fauzia Z. Removal of COD and turbidity to improve wastewater quality using electrocoagulation technique. *Malays J Anal Sci*. 2007; 11(1): 198-205.
23. Arslan-Alaton I, Kabdasli I, Hanbaba D, Kuybu E. Electrocoagulation of a real reactive dyebath effluent using aluminum and stainless steel electrodes. *J Hazard Mater*. 2008; 150(1): 166-73.
24. American Public Health Association American Water Works Association, Water Environment Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 1999; Available at: http://www.mwa.co.th/download/file_upload/SMWW_1000-3000.pdf. Accessed 2014.
25. Bazrafshan E, Mahvi A, Nasserli S, Mesdaghinia A, Vaezi F, Nazmara S. Removal of cadmium from industrial effluents by electrocoagulation process using iron electrodes. *Iran J Environ Health Sci Eng*. 2007; 3(4): 261-6.
26. Ratna Kumar P, Chaudhari S, Khilar KC, Mahajan S. Removal of arsenic from water by electrocoagulation. *Chemosphere*. 2004; 55(9): 1245-52.
27. Dalvand A, Gholami M, Joneidi A, Mahmoodi N. Investigation of electrochemical coagulation process efficiency for removal of reactive red 198 from colored wastewater. *J Color Sci Technol*. 2009; 3(1):97-105.

Investigation electrocoagulation process by using iron and stainless steel electrodes for baker's yeast wastewater treatment

Arbabi M¹, Shafiei S^{2*}, Sedehi M³, Mazaheri-Shoorabi E¹

¹Environmental Health Eng Dept., Shahrekord University Medical Sciences, Shahrekord, I.R. Iran;

²Student, Student Research Committee, Shahrekord University Medical Sciences, Shahrekord, I.R. Iran;

³Epidemiology and Biostatistics Dept., Shahrekord University Medical Sciences, Shahrekord, I.R. Iran.

Received: 6/Aug/2013

Accepted: 27/July/2014

Background and aims: Baker's yeast wastewater is one type of food industry wastewaters that contains high organic pollution and color. In this study, the electrocoagulation process using iron and stainless steel electrodes were investigated as an efficient method for supplementary treatment of Baker's yeast wastewater.

Methods: In this experimental study of laboratory pilot, the effects of operating parameters such as current density (i.e. 80, 100, 120 and 140 A/m²), time (i.e. 15, 30, 45 and 60 min) and electrode material types (i.e. iron and stainless steel) on the removal efficiency of COD (chemical oxygen demand), turbidity and color from Baker's yeast wastewater were investigated and the optimum operation conditions were determined for each of these parameters by using Taguchi statistical method.

Results: Based on the results, the removal efficiency of COD, turbidity and color increased with promoting of current density and operation time and the efficiency of stainless steel electrodes were more than iron electrodes. The optimal operation conditions of electrocoagulation process for supplementary baker's yeast wastewater treatment were: the current density of 120 A/m², with retention time of 45 min and the use of stainless steel electrodes. The results showed that the removal efficiency of COD, turbidity and color in these conditions was 54.84, 44.98 and 40.26% and the corrosion rate of electrodes and consumed electrical energy were 0.086 g/lit and 3.226 Watt/lit, respectively.

Conclusion: Considering environmental and economical priorities, this process can be suggested as a supplementary treatment process for wastewaters with high organic pollution and color.

Keywords: Baker's yeast wastewater, Electrocoagulation, Chemical Oxygen Demand, Iron electrode, Stainless steel electrode.

Cite this article as: Arbabi M, Shafiei S, Sedehi M, Mazaheri-Shoorabi E. Investigation electrocoagulation process by using iron and stainless steel electrodes for baker's yeast wastewater treatment. J Shahrekord Univ Med Sci. 2014; 16(5): 1-12.

***Corresponding author:**

Shahrekord University of Medical Sciences, Shahrekord, I.R. Iran. Tel: 00989139760462,
E-mail: samanehshafiei@ymail.com